

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

43

(11)Publication number : 10-079345

(43)Date of publication of application : 24.03.1998

(51)Int.Cl.

H01L 21/027
G03F 7/20

(21)Application number : 08-255505

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 04.09.1996

(72)Inventor : KUDO SHINTARO
SUENAGA YUTAKA

(54) PROJECTION OPTICAL SYSTEM AND EXPOSING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to correct the sum of aberration and Petzval by a method wherein the first lens group to the sixth lens group are arranged from the side of an object, and a specific condition is satisfied.

SOLUTION: The first and the second lens groups of positive power, the third lens group of negative power, the fourth lens group of positive power, the fifth lens group of negative power and the sixth lens group of positive power are formed in the order from the side of an object. By satisfying the condition of formulas I to Vq, the first lens group suppresses the generation of higher aberration, the second lens group corrects distortion, and the third lens group corrects the sum of Petzval. The L in the formula indicates the distance from the first object to the second object, En indicates the distance from the top point of the lens surface on the side of the first object to the pupil of incidence, Ex indicates the distance from the top point of the lens surface of the second object side to the pupil of incidence, β indicates magnification of projection, f1, f3, f4, f5 and f6 indicate the distance of focal point of the first, third, fourth, fifth and sixth lens groups, bf1 indicates the distance from the top point of the surface on the side of the fast lens group to the back side focal point.

$$E_n | > L$$

I

$$E_n | > | L / \beta |$$

II

$$1. \ 0 < f_1 / f_3 < 1. \ 5$$

III

$$0. \ 04 < | f_3 / L | < 0. \ 06$$

IV

$$0. \ 04 < | f_5 / L | < 0. \ 06$$

V

$$0. \ 6 < f_6 / f_4 < 1. \ 3$$

VI

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's
decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of
rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-79345

(43)公開日 平成10年(1998)3月24日

(51)Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 L 21/027			H 0 1 L 21/30	5 1 5 D
G 0 3 F 7/20	5 2 1		G 0 3 F 7/20	5 2 1
			H 0 1 L 21/30	5 1 6 A

審査請求 未請求 請求項の数8 F D (全 16 頁)

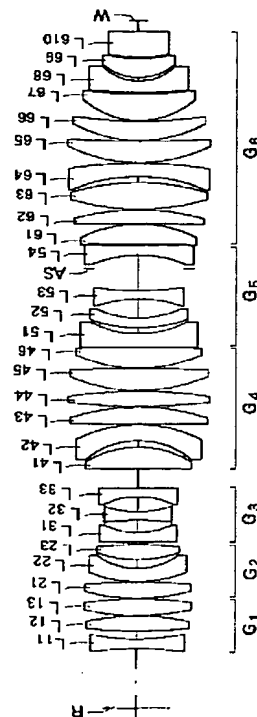
(21)出願番号	特願平8-255505	(71)出願人	000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
(22)出願日	平成8年(1996)9月4日	(72)発明者	工藤 慎太郎 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株 式会社ニコン内
		(72)発明者	末永 豊 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株 式会社ニコン内
		(74)代理人	弁理士 猪熊 克彦

(54)【発明の名称】 投影光学系及び露光装置

(57)【要約】

【課題】入射瞳と射出瞳をほぼ無限遠に位置させるいわゆる両側テレセントリックな光学系としながらも、広い露光範囲での像面平坦性を確保するためのベッツバル和の補正と、微細なパターンを高解像に転写するための大きいNAの光束に対する諸収差の良好な補正との両立を実現させることのできる高性能な投影光学系を提供する。

【解決手段】第1物体Rの像を第2物体W上に投影する投影光学系P Lにおいて、第1物体R側から順に、正のパワーの第1レンズ群G₁と、正のパワーの第2レンズ群G₂と、負のパワーの第3レンズ群G₃と、正のパワーの第4レンズ群G₄と、負のパワーの第5レンズ群G₅と、正のパワーの第6レンズ群G₆とを有し、且つ所要の条件を満足することを特徴とする。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】第 1 物体の像を第 2 物体上に投影する投影光学系において、

前記第 1 物体側から順に、正のパワーの第 1 レンズ群と、正のパワーの第 2 レンズ群と、負のパワーの第 3 レンズ群と、正のパワーの第 4 レンズ群と、負のパワーの第 5 レンズ群と、正のパワーの第 6 レンズ群とを有し、且つ以下の各条件を満足することを特徴とする投影光学系。

$$|E_0| > L \quad (1)$$

$$|E_x| > |L/\beta| \quad (2)$$

$$1.0 < b f_1/f_1 < 1.5 \quad (3)$$

$$0.04 < |f_3/L| < 0.06 \quad (4)$$

$$0.04 < |f_5/L| < 0.06 \quad (5)$$

$$0.6 < f_6/f_4 < 1.3 \quad (6)$$

但し、 L ：前記第 1 物体から第 2 物体までの距離

E_0 ：最も第 1 物体側のレンズ面の頂点から入射瞳まで

$$-0.5 < (\Sigma P_1 + \Sigma P_2) / \Sigma P_3 < -0.2 \quad (7)$$

但し、 ΣP_1 ：前記第 1 レンズ群のベッツバール和

ΣP_2 ：前記第 2 レンズ群のベッツバール和

ΣP_3 ：前記第 3 レンズ群のベッツバール和

である。

【請求項 4】以下の条件を満足する、請求項 1、2 又は 3 記載の投影光学系。

$$0.14 < f_2/L < 0.25 \quad (8)$$

但し、 f_2 ：前記第 2 レンズ群の焦点距離である。

【請求項 5】前記第 3 レンズ群と前記第 5 レンズ群とに属する各レンズの各レンズ面のパワーを ϕ とするとき、何れのレンズ面についても以下の条件を満足する、請求項 1、2、3 又は 4 記載の投影光学系。

$$|\phi \cdot L| < 6.7 \quad (9)$$

【請求項 6】 $|\beta| < 1$ である、請求項 1、2、3、4 又は 5 記載の投影光学系。

【請求項 7】前記第 6 レンズ群は正のパワーのレンズを 6 枚以上有する、請求項 1、2、3、4、5 又は 6 記載の投影光学系。

【請求項 8】照明光学装置によってレチクルを照明し、該レチクル上のパターンを投影光学系によってウエハ上に転写する露光装置において、

前記投影光学系は前記レチクル側から順に、正のパワーの第 1 レンズ群と、正のパワーの第 2 レンズ群と、負のパワーの第 3 レンズ群と、正のパワーの第 4 レンズ群と、負のパワーの第 5 レンズ群と、正のパワーの第 6 レンズ群とを有し、且つ以下の各条件を満足することを特徴とする露光装置。

$$|E_0| > L \quad (1)$$

$$|E_x| > |L/\beta| \quad (2)$$

$$1.0 < b f_1/f_1 < 1.5 \quad (3)$$

$$0.04 < |f_3/L| < 0.06 \quad (4)$$

$$0.04 < |f_5/L| < 0.06 \quad (5)$$

の距離

E_x ：最も第 2 物体側のレンズ面の頂点から射出瞳までの距離

β ：投影光学系の投影倍率

f_1 ：前記第 1 レンズ群の焦点距離

$b f_1$ ：前記第 1 レンズ群の最も第 2 物体側のレンズ面の頂点から第 1 レンズ群の後側焦点までの距離

f_3 ：前記第 3 レンズ群の焦点距離

f_4 ：前記第 4 レンズ群の焦点距離

f_5 ：前記第 5 レンズ群の焦点距離

f_6 ：前記第 6 レンズ群の焦点距離

である。

【請求項 2】前記第 1 レンズ群は、逆望遠系のパワー配置であることを特徴とする請求項 1 記載の投影光学系。

【請求項 3】以下の条件を満足する、請求項 1 又は 2 記載の投影光学系。

$$0.6 < f_6/f_4 < 1.3 \quad (6)$$

但し、 L ：前記レチクルからウエハまでの距離

E_0 ：最もレチクル側のレンズ面の頂点から入射瞳までの距離

E_x ：最もウエハ側のレンズ面の頂点から射出瞳までの距離

β ：投影光学系の投影倍率

f_1 ：前記第 1 レンズ群の焦点距離

$b f_1$ ：前記第 1 レンズ群の最もウエハ側のレンズ面の頂点から第 1 レンズ群の後側焦点までの距離

f_3 ：前記第 3 レンズ群の焦点距離

f_4 ：前記第 4 レンズ群の焦点距離

f_5 ：前記第 5 レンズ群の焦点距離

f_6 ：前記第 6 レンズ群の焦点距離

である。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は第 1 物体上のパターンを第 2 物体としての基板等に投影するための投影光学系に関するものであり、特に、第 1 物体としてレチクル（マスク）上に形成された半導体用または液晶用のパターンを、第 2 物体としての基板（ウエハ、プレート等）上に投影露光するのに好適な投影光学系に係わるものである。

【0002】

【従来の技術】近年、IC、LSI 等の集積回路パターン転写には、主に縮小投影露光装置が用いられている。この装置に用いられる投影光学系には、昨今の集積回路の高集積化に伴い、広い露光領域と、その露光領域全体にわたってのより高い解像力が要求されている。投影光学系の解像力の向上については、露光波長をより短くするか、あるいは投影光学系の開口数（NA）を大きくす

ることが考えられる。露光波長の短波長化に関しては、現在光源として主に使われている水銀ランプの紫外域スペクトルの g 線 (436 nm) や i 線 (365 nm) に代わって、次世代に向けて KrF エキシマレーザー (248 nm) や ArF エキシマレーザー (193 nm) などが注目されている。そして、以上の各種の露光波長の光によって、レチクル上のパターンをウエハ上に投影露光するための投影光学系が提案されている。

【0003】広い露光領域を達成するためには、投影光学系に起因する像面湾曲の補正が欠かせず、その必要条件としてベッツバル和を十分に小さくしなければならない。しかし、現実的な露光装置全体の大きさの制約などから、投影光学系の全長 (物像間距離) が制限されるので、解像力の向上に関する NA を大きくするとき、ベッツバル和の補正と広い露光領域全体でのコマ収差等の他の収差の補正との両立は容易ではない。

【0004】また、前記項目と共に像歪みの低減が重要である。ここでいう像歪みとは、投影光学系によるディストーション (歪曲収差) の他に、重ね合わせ露光時の投影倍率誤差を含む。投影倍率誤差を低減させるため、一般にこれらの投影光学系では、像面であるウエハの平坦度や回路パターン転写時のフォーカスエラーなど、光軸方向の誤差に起因する投影倍率の変化を無視できるように、射出瞳が実質的に無限遠にあるいわゆる像側テレセントリックな光学系としていることが多い。しかし今日では回路パターンの微細化が進むにつれ、物体側でのマスクの平坦度等も無視できなくなっており、物体側、像側の両側テレセントリックな光学系が提案されている。この例としては、特開昭 63-118115 号、特開平 4-157412 号、特開平 5-173065 号等のものがある。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】以上の各特許公報にて提案された光学系の中には、物体側、像側の両側テレセントリックな投影光学系が開示されている。しかしながら、以上の各特許公報にて提案されている両側テレセントリック投影光学系では、解像力に寄与する開口数 (NA) が十分には大きくなく、さらにはベッツバル和と他の収差の補正との両立が十分にはなされていなかった。本発明は以上の問題点に鑑みてなされたものであり、入射瞳と射出瞳をほぼ無限遠に位置させるいわゆる両側テレセントリックな光学系としながらも、広い露光範囲での像面平坦性を確保するためのベッツバル和の補正と、微細なパターンを高解像に転写するための大きい NA の光束に対する諸収差の良好な補正との両立を実現させることのできる高性能な投影光学系を提供することを課題としている。

【0006】

【課題を解決するための手段】上記の課題を達成するために、本発明に係わる投影光学系は、物体側より順に、

正のパワーの第 1 レンズ群、正のパワーの第 2 レンズ群、負のパワーの第 3 レンズ群、正のパワーの第 4 レンズ群、負のパワーの第 5 レンズ群、及び正のパワーの第 6 レンズ群を少なくとも有している。そして、

L : 第 1 物体から第 2 物体までの距離 (物像間距離)

E_o : 最も第 1 物体側のレンズ面 (第 1 レンズ面) の頂点から入射瞳までの距離

E_x : 最も第 2 物体側 (像側) のレンズ面 (最終レンズ面) の頂点から射出瞳までの距離

β : 投影光学系の投影倍率

f_1 : 第 1 レンズ群の焦点距離

$b f_1$: 第 1 レンズ群の最も第 2 物体側のレンズ面の頂点から第 1 レンズ群の後側 (第 2 物体側) 焦点までの距離

f_3 : 第 3 レンズ群の焦点距離

f_4 : 第 4 レンズ群の焦点距離

f_5 : 第 5 レンズ群の焦点距離

f_6 : 第 6 レンズ群の焦点距離

とするとき、

$$|E_o| > L \quad (1)$$

$$|E_x| > |L/\beta| \quad (2)$$

$$1.0 < b f_1 / f_1 < 1.5 \quad (3)$$

$$0.04 < |f_3/L| < 0.06 \quad (4)$$

$$0.04 < |f_5/L| < 0.06 \quad (5)$$

$$0.6 < f_6/f_4 < 1.3 \quad (6)$$

なる各条件を満足するように構成したものである。

【0007】本発明による投影光学系では、物体側、像側の両側をほぼテレセントリックな光学系とすることによって、物体面や像面のたわみなどの光軸方向のずれによる像歪みを無視できる量にする対策がとられている。よって、光軸方向のずれによる像歪みが無視できる程度の実質的なテレセントリックな光学系とするために、上記条件 (1) と (2) を満足する必要がある。条件式

(1) は入射瞳位置を規定したものである。ここでいう入射瞳位置とは、絞り AS よりも第 1 物体側に配置された光学系による絞り AS の近軸領域における像位置を、光学系の第 1 物体側の第 1 レンズ面頂点より測った距離である。条件式 (1) を満足しないと、第 1 物体面のたわみ等による像面上での像歪みが無視できなくなる。同様に条件式 (2) は射出瞳位置を規定したものである。条件式 (2) を満足しないと、像面であるウエハなどの第 2 物体の平坦度や、回路パターン転写時のフォーカスエラーなど、光軸方向の誤差による像面上での像歪みが無視できなくなる。

【0008】また、正のパワーの第 1 レンズ群は第 1 物体側をテレセントリックな光学系に維持すると共に、ベッツバル和を補正するために、上記条件 (3) を満足しなければならない。条件式 (3) は、ベッツバル和を良好に補正するために、第 1 レンズ群の逆望遠系パワー配置の程度を規定している。条件式 (3) の下限を越

えると、第1レンズ群の後側主点が第1物体に近づき過ぎてしまい、第1物体に近い位置に適切な負のパワーを配置することができず、ベッツバル和を良好に補正することが困難となる。逆に条件式(3)の上限を越えると、ベッツバル和の補正には都合が良いが、第1物体に近い位置に配置された負のパワーが相対的に強くなり過ぎてしまい、ディストーションを良好に補正できなくなってしまう。なお、下限値を1.03とし、上限値を1.40とすることにより、更に良い結果が得られる。

【0009】また、第1レンズ群は、物体側から順に負のパワー、正のパワーとなる逆望遠系のパワー配置とすることが好ましい。このような逆望遠系のパワー配置とすることで、光束が緩やかに曲げられるようになり、高次収差の発生を抑えることができる。

【0010】第1レンズ群に引き続く正のパワーの第2レンズ群は、主にディストーションを補正している。具体的には、この正のパワーの第2レンズ群によって正のディストーションを発生させて、第1レンズ群の凹面と、負のパワーの第3レンズ群によって発生する負のディストーションとをバランス良く補正している。

【0011】負のパワーの第3レンズ群と負のパワーの第5レンズ群は、主にベッツバル和を補正している。ここで、上記条件(4)と(5)を満足すると、ベッツバル和と他諸収差の良好な補正との両立が可能となり、大きいNAの光学系を達成することができる。条件式(4)の上限を越えると、第3レンズ群の負のパワーが弱くなり過ぎてしまい、ベッツバル和を良好に補正

$$-0.5 < (\Sigma P_1 + \Sigma P_2) / \Sigma P_3 < -0.2 \quad (7)$$

なる条件を満足することが好ましい。条件式(7)の下限を越えると、第2レンズ群によるベッツバル和の増大が、第1レンズ群と第3レンズ群に比較して相対的に無視できなくなる。この結果、第2レンズ群によるベッツバル和の増大分を相殺するために、第5レンズ群の負のパワーの負担が重くなり、第5レンズ群で発生するサジタルコマフレアを補正しきれなくなってしまう。逆に条件式(7)の上限を越えると、ベッツバル和の補正に関しては問題ないが、第1レンズ群と第3レンズ群の凹面で発生する負のディストーションに比較して、第2レンズ群の凸面による効果が相対的に弱くなり過ぎてしまい、第2レンズ群による正のディストーションの発生が不十分となる。この結果、第1レンズ群と第3レンズ群で発生する負のディストーションを良好に補正するのが困難となってしまう。

【0014】なお、各レンズ面のベッツバル和への寄与 P_i とは、一般的に次式(a)で定義され、あるレンズ群の部分系ベッツバル和とは、そのレンズ群に属する各レンズの各レンズ面でのベッツバル和の寄与 P_i の和をとったものである。

$$P_i = \left(\frac{1}{n_{i-1}} - \frac{1}{n_i} \right) \frac{1}{r_i} \quad (a)$$

することができない。逆に条件式(4)の下限を越えると、第3レンズ群の負のパワーが強くなり過ぎてしまい、第3レンズ群で発生するコマ収差やディストーションを良好に補正できなくなってしまう。同様に条件式(5)の上限を越えると、第5レンズ群の負のパワーが弱くなり過ぎてしまい、ベッツバル和を良好に補正することができない。逆に条件式(5)の下限を越えると、第5レンズ群の負のパワーが強くなり過ぎてしまい、第5レンズ群で発生するサジタルコマフレアを良好に補正できなくなってしまう。

【0012】正のパワーの第4レンズ群と正のパワーの第6レンズ群は、負のパワーの第5レンズ群をそれらの間に配置して、ダブルガウス・タイプの変型を構成している。この構成をとることにより、ダブルガウスの特徴である対称性による収差相殺の長所を十分に活用することができる。上記条件(6)は、この対称性による良好な収差補正に適した第4レンズ群と第6レンズ群のパワーの比率を規定するものである。この条件式(6)の上限を越えても下限を越えても、対称性による収差相殺補正の適切な範囲から出てしまい、コマ収差やディストーションの良好な補正ができなくなってしまう。

【0013】本発明においては、
 ΣP_1 : 第1レンズ群のベッツバル和
 ΣP_2 : 第2レンズ群のベッツバル和
 ΣP_3 : 第3レンズ群のベッツバル和
 とするとき、

ここで、 r_i は第*i*レンズ面の曲率半径、 n_i は第*i*レンズ面に続く媒質の屈折率を意味し、また、 r_i が ∞ 即ち平面のとき、 P_i は0となる。

【0015】本発明においてはまた、
 f_2 : 第2レンズ群の焦点距離
 とするとき、

$$0.14 < f_2 / L < 0.25 \quad (8)$$

なる条件を満足することが好ましい。条件式(8)の上限を越えると、第2レンズ群の正のパワーが弱くなり過ぎてしまい、ディストーションを良好に補正することが困難となる。逆に条件式(8)の下限を越えると、第2レンズ群の正のパワーが強くなり過ぎてしまい、ベッツバル和を増大させると共に、高次のディストーションの発生が顕著になる。

【0016】本発明においてはまた、第3レンズ群と第5レンズ群とに属する各レンズの各レンズ面のパワーを ϕ とするとき、何れのレンズ面についても、

$$|\phi \cdot L| < 6.7 \quad (9)$$

なる条件を満足することが好ましい。条件式(9)の範囲を越えて何れかのレンズ面のパワーが強くなり過ぎてしまうと、高次収差の発生が顕著になり、他のレンズ群で補正するのが困難となる。

【0017】

【発明の実施の形態】本発明の実施の形態を説明する。以下の各実施例は、本発明による投影光学系を露光装置に応用したものである。まず露光装置の全体構成を図1によって説明する。投影光学系P Lの物体面には、所定の回路パターンが形成された投影原版としてのレチクルR（第1物体）が配置されており、投影光学系P Lの像面には、基板としてのウエハW（第2物体）が配置されている。レチクルRはレチクルステージR Sに保持され、ウエハWはウエハステージW Sに保持されている。レチクルRの上方には、ケーラー照明法によってレチクルRを均一に照明する照明光学装置I Sが配置されており、また投影光学系P Lは物体側にテレセントリックに構成されている。したがって投影光学系P Lの開口絞りA Sの位置には、照明光学装置I S中の光源の像が形成される。そしてレチクルRのパターン像が、投影光学系P LによりウエハW上に露光（転写）される。いずれの実施例も、照明光学装置I S内部に配置される光源として、193.4 nmの露光波長入を持つ光を供給するエキシマレーザを使用している。

【0018】図2～図6は、本発明による投影光学系の第1～第5実施例のレンズ構成図を示している。図2～図6に示す如く、各実施例の投影光学系は、第1物体としてのレチクルR側より順に、正のパワーの第1レンズ群G₁と、正のパワーの第2レンズ群G₂と、負のパワーの第3レンズ群G₃と、正のパワーの第4レンズ群G₄と、負のパワーの第5レンズ群G₅と、正のパワーの第6レンズ群G₆とを有し、物体側（レチクルR側）及び像側（ウエハW側）においてほぼテレセントリックとなっており、縮小倍率を有するものである。またいずれの実施例の投影光学系も、像側のNAが0.6、投影倍率βが1/4である。ウエハW上での露光領域の直径は、第1実施例と第2実施例では26.8であり、第3～第5実施例では30.6である。

【0019】次に図2に示す第1実施例の具体的なレンズ構成について説明する。第1レンズ群G₁は物体側より順に、1枚の両凹レンズL₁₁と2枚の凸レンズL₁₂、L₁₃を配置することによって、逆望遠系を構成している。ここではL₁₁を両凹レンズとすることで、負のパワーを2面に分担させて負のディストーションの発生を抑え、しかも負のパワーを十分に強くして、良好にベッツバル和を補正している。

【0020】第2レンズ群G₂は物体側より順に、1枚の凸レンズL₂₁と、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₂₂と、凸レンズL₂₃の3枚によって構成されている。物体高によって光束の通る部分がより異なる凸レンズL₂₁によって、ディストーションを効果的に補正すると共に、メニスカスレンズL₂₂の像側に向けた凹面によって条件式（7）を満足するように構成し、こうして第2レンズ群G₂でのベッツバル和の増大を抑えてい

る。

【0021】第3レンズ群G₃は物体側より順に、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₃₁、両凹レンズL₃₂、そして物体側に凹面を向けた平凹レンズL₃₃の3枚のレンズにより構成されている。本第1実施例のように、ベッツバル和の補正に必要な負のパワーを少なくとも4面に分担させることが、コマ収差の発生を他のレンズ群で補正可能な量に抑えるのに好ましい。

【0022】第4レンズ群G₄は物体側より順に、凸レンズL₄₁、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₄₂、そして4枚の凸レンズL₄₃、L₄₄、L₄₅、L₄₆によって構成されている。負メニスカスレンズL₄₂の物体側に向けた凹面は、第2レンズ群G₂のL₂₂の機能と同様にベッツバル和の増大を抑えており、こうして第3レンズ群G₃と第5レンズ群G₅でのベッツバル和補正の負担を軽減して、過度のサジタルコマフレア等の発生を防いでいる。

【0023】第5レンズ群G₅は物体側より順に、像側に凹面を向けた平凹レンズL₅₁、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₅₂、両凹レンズL₅₃、そして物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₅₄の4枚の凹レンズによって構成されている。なお、本第1実施例では、第5レンズ群G₅内の凹レンズL₅₃とL₅₄の間に開口絞りA Sを配置している。ここで凹レンズL₅₁の像側に向けた凹面と凹レンズL₅₄の物体側に向けた凹面は、互いに絞りA Sに関して対称な向きに配置されており、こうして非点収差の発生を抑制している。しかしそれだけでは負のパワーを強くしたとき、ダブルガウス・タイプに付随する問題点であるサジタルコマフレアが十分に補正しきれない。そこで本第1実施例では、凹レンズL₅₁とL₅₄の向かい合う凹面の間に2枚の凹レンズL₅₂、L₅₃を挿入することによって、各凹面に負のパワーを分担させ、サジタルコマ収差の発生を抑え、なお且つベッツバル和を良好に補正して像面湾曲の平坦性を確保している。

【0024】第6レンズ群G₆は物体側より順に、3枚の凸レンズL₆₁、L₆₂、L₆₃と、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₆₄と、3枚の凸レンズL₆₅、L₆₆、L₆₇と、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₆₈と、2枚の凸レンズL₆₉、L₆₁₀との都合10枚のレンズによって構成されている。凹レンズL₆₄は光束が大きく広がったところに配置され、物体側に凹面を向けたメニスカス形状とすることで、効率よく球面収差を補正している。また、凸レンズに関しては、NA0.6の光束に対して高次の球面収差やコマ収差の発生をできるだけ抑えるように、正のパワーを多数のレンズ面に分割している。本第1実施例では、第6レンズ群G₆のパワーを8枚の正レンズと2枚の負レンズで構成しているが、第6レンズ群G₆は少なくとも6枚の正レンズを有することが、球面収差補正上好ましい。また、凹レンズ

L₆₈では、像側に向けた凹面によってディストーションの補正とコマ収差の補正との良好なバランスを可能としている。

【0025】次に、図3に示す第2実施例の具体的なレンズ構成は、第1実施例と類似するが、第1レンズ群G₁が物体側より順に、凸レンズL₁₁と凹レンズL₁₂、そして2枚の凸レンズL₁₃、L₁₄の4枚のレンズから構成されている点で異なる。凸レンズL₁₁と凹レンズL₁₂では、ベッツバル和の補正を維持しつつ、高次のディストーション補正と全露光領域にわたるテレセントリック性との良好なバランスに寄与している。

【0026】図4に示す第3実施例の具体的なレンズ構成は、第1実施例と類似するが、第1レンズ群G₁が物体側より順に、像側に凸面を向けたメニスカス正レンズL₁₁と凸レンズL₁₂との2枚の凸レンズから構成されている点で異なる。このように第1レンズ群G₁の逆望遠系を構成する際に、負レンズを含まなくてもよい。すなわち物体側に向けた凹面とある程度厚いレンズ厚を持つ正メニスカスレンズL₁₁を利用することで、条件式

(3)を満たすことができ、この結果ベッツバル和を良好に補正することができる。また第6レンズ群G₆中の物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₆₄と、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₆₉との間に、4枚の凸レンズL₆₅、L₆₆、L₆₇、L₆₈を有する。すなわち先の第1実施例では、この部分に3枚の凸レンズL₆₅、L₆₆、L₆₇を配置していたが、球面収差とコマ収差を良好に補正するためには、この部分に少なくとも3枚以上の凸レンズを配置することが好ましい。この第3実施例では4枚の凸レンズを配置することにより、より良好に球面収差とコマ収差を補正している。

【0027】図5に示す第4実施例の具体的なレンズ構成は、第3実施例と類似するが、第4レンズ群G₄の凸レンズL₄₁と物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL₄₂との間の距離の点で、主に異なる。このL₄₁とL₄₂との間隔の影響で、第4実施例では高次収差補正のバランスが他の実施例と多少異なるが、他の実施例とほぼ同様の機能を達成している。

【0028】図6に示す第5実施例の具体的なレンズ構成は、第3実施例に類似するが、第1レンズ群G₁が物体側より順に、1枚の両凹レンズL₁₁と2枚の凸レンズL₁₂、L₁₃との3枚から構成される点で主に異なる。第1レンズ群G₁を負レンズL₁₁を含む3枚の構成にすることによって、ベッツバル和をより積極的に補正している。また第6レンズ群G₆において、物体側に凹面を向けた凹レンズL₆₄と像側に向けた凹面を持つ凹レンズL₆₉の間に、第3実施例と同様に4枚の凸レンズL₆₅、L₆₆、L₆₇、L₆₈を配置しているので、広い画角に対してもコマ収差の補正が可能となっている。よって広い露光領域においても像面湾曲、球面収差、コマ収差等を良好にバランス良く補正している。

【0029】以下の表1～表5に、それぞれ第1～第5実施例の諸元の値を掲げる。各表中、第1欄の数字は物体側（レチクル側）からの各レンズ面の番号、第2欄rは各レンズ面の曲率半径、第3欄dは各レンズ面の間隔、第4欄は各レンズの材質、第5欄は各レンズの属するレンズ群の番号を表す。露光波長193.4nmに対する合成石英（SiO₂）と蛍石（CaF₂）の屈折率nは、

SiO₂: n=1.56019

CaF₂: n=1.50138

である。

【0030】また以下の表6に、各実施例について、前記各条件式に関連する諸値を掲げる。同表中、(7)欄の[Σ]は、条件式(7)の(ΣP₁+ΣP₂)/ΣP₃を意味する。また(9)欄中、Sは第3レンズ群G₃と第5レンズ群G₅中で最大のパワーφを有するレンズ面の番号、r_{min}はそのレンズ面の曲率半径、nはそのレンズ面を有するレンズの屈折率、|φ・L|はそのレンズ面についての値を示す。したがって最大のパワーφを有するレンズ面について条件式(9)を満たす限り、第3レンズ群G₃と第5レンズ群G₅に属する他のレンズ面は、当然に条件式(9)を満たすことになる。

【0031】

【表1】

r	d								
0	(レチクル)	103.390978							
1	-453.18731	17.000000	S i O ₂	G ₁					
2	370.52697	13.613089							
3	710.84358	26.000000	S i O ₂	G ₁					
4	-350.78200	1.000000							
5	367.53957	28.000000	S i O ₂	G ₁					
6	-567.47540	1.000000							
7	289.50734	29.000000	S i O ₂	G ₂					
8	-899.09021	1.000000							
9	199.45895	23.000000	S i O ₂	G ₂					
10	103.61200	15.764153							
11	188.56105	25.800000	S i O ₂	G ₂					
12	-574.20881	4.242446							
13	3000.00000	16.616840	S i O ₂	G ₃					
14	118.18165	21.762847							
15	-336.11504	15.000000	S i O ₂	G ₃					
16	161.39927	25.871656							
17	-120.57109	15.000000	S i O ₂	G ₃					
18	∞	33.995810							
19	-2985.44349	36.979230	S i O ₂	G ₄					
20	-150.10550	11.683590							
21	-122.25791	28.000000	S i O ₂	G ₄					
22	-204.99200	1.000000							
23	∞	29.240000	S i O ₂	G ₄					
24	-312.57215	1.000000							
25	965.45342	27.000000	S i O ₂	G ₄					
26	-643.40298	1.000000							
27	258.67450	39.000000	C a F ₂	G ₄					
28	-2967.14698	1.000000							
29	246.35328	35.600000	C a F ₂	G ₄					
30	-2970.04481	1.000000							
31	∞	24.000000	S i O ₂	G ₅					
32	157.63171	10.667015							
33	234.15227	17.000000	S i O ₂	G ₅					
34	157.66180	32.592494							
35	-200.72428	15.000000	S i O ₂	G ₅					
36	432.89447	37.939196							
37	(開口絞り)	24.400000							
38	-175.71116	17.000000	S i O ₂	G ₅					
39	-2985.98357	1.000000							
40	-2985.99700	35.500000	C a F ₂	G ₆					
41	-189.63629	1.000000							
42	-3000.00000	24.400000	S i O ₂	G ₆					
43	-350.29744	1.000000							
44	362.38815	46.500000	C a F ₂	G ₆					
45	-361.31567	10.870000							
46	-251.97148	23.000000	S i O ₂	G ₆					
47	-662.28158	1.000000							
48	238.98700	38.100000	C a F ₂	G ₆					
49	1994.63265	1.000000							
50	211.51173	33.400000	C a F ₂	G ₆					
51	720.00000	1.000000							
52	129.92966	46.000000	C a F ₂	G ₆					
53	669.85166	2.783304							
54	970.74182	19.986222	S i O ₂	G ₆					
55	78.20244	6.273142							
56	86.12755	32.522737	S i O ₂	G ₆					
57	230.00000	2.862480							
58	232.22064	44.183443	S i O ₂	G ₆					
59	350.03691	19.466219							
60	(ウエハ)								

【 0 0 3 2 】

【 表 2 】

r	d								
0	(レチクル)	80.005623				43	-188.48712	1.000000	
1	3000.00000	17.000000	S i O ₂	G ₁		44	-3000.00000	24.400000	S i O ₂ G ₈
2	-1100.07662	7.000000				45	-353.86205	1.000000	
3	-382.34142	17.000000	S i O ₂	G ₁		46	361.05640	46.500000	C a F ₂ G ₆
4	370.98157	19.096933				47	-362.74962	10.870000	
5	741.43231	26.000000	S i O ₂	G ₁		48	-252.13935	23.000000	S i O ₂ G ₈
6	-346.96815	1.000000				49	-639.45695	1.000000	
7	378.55115	28.000000	S i O ₂	G ₁		50	247.94411	38.100000	C a F ₂ G ₈
8	-618.11456	1.000000				51	2772.28294	1.000000	
9	291.02156	29.000000	S i O ₂	G ₂		52	215.80752	33.400000	C a F ₂ G ₈
10	-960.02967	1.000000				53	741.95006	1.000000	
11	213.50227	23.000000	S i O ₂	G ₂		54	129.48833	46.000000	C a F ₂ G ₆
12	102.07483	15.012850				55	603.00127	2.812610	
13	181.74774	25.800000	S i O ₂	G ₂		56	838.71234	21.000000	S i O ₂ G ₈
14	-533.56895	1.000000				57	78.85022	5.688924	
15	2712.39289	16.616840	S i O ₂	G ₃		58	86.96257	33.318579	S i O ₂ G ₈
16	121.06433	20.547736				59	230.00000	1.975770	
17	-296.23495	15.000000	S i O ₂	G ₃		60	232.95189	44.943637	S i O ₂ G ₆
18	161.25942	25.185487				61	350.55917	19.466219	
19	-118.38102	15.000000	S i O ₂	G ₃		62	(ウエハ)		
20	∞	33.572517				【 0 0 3 3 】			
21	-2884.98321	36.979230	S i O ₂	G ₄		【 表 3 】			
22	-146.43548	11.683590							
23	-120.69431	28.000000	S i O ₂	G ₄					
24	-204.17381	1.000000							
25	∞	29.240000	S i O ₂	G ₄					
26	-312.30286	1.000000							
27	903.22838	27.000000	S i O ₂	G ₄					
28	-665.97951	1.000000							
29	260.25775	39.000000	C a F ₂	G ₄					
30	-2965.88489	1.000000							
31	239.96625	35.600000	C a F ₂	G ₄					
32	-3000.00000	1.000000							
33	∞	24.000000	S i O ₂	G ₅					
34	153.46592	10.823731							
35	231.12502	17.000000	S i O ₂	G ₅					
36	157.10450	32.398005							
37	-195.18116	15.000000	S i O ₂	G ₅					
38	443.35877	37.069128							
39	(開口絞り)	24.400000							
40	-175.99683	17.000000	S i O ₂	G ₅					
41	-2899.97402	1.000000							
42	-2966.55706	35.500000	C a F ₂	G ₆					

r	d								
0	(レチクル)	87.842324				43	-327.35127	9.017132	
1	-351.29858	74.258738	S i O ₂	G ₁		44	-229.80012	21.000000	S i O ₂ G ₆
2	-298.15798	0.500000				45	-1820.23082	0.500000	
3	553.95876	25.000000	S i O ₂	G ₁		46	535.39152	26.000000	C a F ₂ G ₆
4	-617.71850	0.500000				47	-988.48090	0.500000	
5	253.09163	25.500000	S i O ₂	G ₂		48	327.47057	27.500000	S i O ₂ G ₆
6	-3777.33056	0.500000				49	4987.19075	0.500000	
7	190.14717	27.805896	S i O ₂	G ₂		50	253.24680	27.500000	C a F ₂ G ₆
8	105.42692	15.912587				51	1316.11991	0.500000	
9	201.82417	20.000000	S i O ₂	G ₂		52	132.63747	42.963984	C a F ₂ G ₆
10	-584.55642	0.500000				53	629.46057	1.800000	
11	3000.00000	19.095104	S i O ₂	G ₃		54	868.98502	35.719214	S i O ₂ G ₆
12	105.34607	23.338460				55	80.85953	6.365035	
13	-337.23699	15.382167	S i O ₂	G ₃		56	88.09767	39.251047	C a F ₂ G ₆
14	248.69492	21.216782				57	355.00000	0.530420	
15	-133.88017	15.448042	S i O ₂	G ₃		58	351.07133	45.922298	S i O ₂ G ₆
16	2973.13758	47.591478				59	436.07534	14.155299	
17	-5000.00000	26.416153	S i O ₂	G ₄		60	(ウエハ)		
18	-169.85758	13.500000				【 0 0 3 4 】			
19	-125.21057	33.670949	S i O ₂	G ₄		【 表 4 】			
20	-220.03085	0.500000							
21	∞	26.520978	S i O ₂	G ₄					
22	-325.33259	0.500000							
23	736.93850	29.000000	S i O ₂	G ₄					
24	-560.64661	0.500000							
25	366.01277	28.000000	S i O ₂	G ₄					
26	-3481.04946	0.500000							
27	242.17825	45.121070	C a F ₂	G ₄					
28	-5000.00000	0.500000							
29	∞	34.715089	S i O ₂	G ₅					
30	152.12354	11.669230							
31	237.82697	16.443006	S i O ₂	G ₅					
32	154.91919	38.109146							
33	-185.64902	14.321328	S i O ₂	G ₅					
34	559.07808	26.892063							
35	(開口絞り)	21.952360							
36	-147.25357	17.830696	S i O ₂	G ₅					
37	∞	0.500000							
38	5000.00000	32.000000	C a F ₂	G ₆					
39	-170.72868	0.500000							
40	-930.41140	21.000000	S i O ₂	G ₆					
41	-289.67853	0.500000							
42	403.38962	38.720628	C a F ₂	G ₆					

r	d						
0	(レチクル)	86.313742			43	-378.84873	9.985852
1	-433.57842	74.258738	SiO ₂	G ₁	44	-244.09971	21.000000 SiO ₂ G ₆
2	-331.50654	0.500000			45	-2680.44816	0.500000
3	559.96288	25.000000	SiO ₂	G ₁	46	359.48999	26.000000 CaF ₂ G ₆
4	-583.13377	0.500000			47	-5000.00000	0.500000
5	262.88205	25.500000	SiO ₂	G ₂	48	391.78229	27.500000 SiO ₂ G ₆
6	-2712.40287	0.500000			49	-5000.00000	0.500000
7	193.77173	26.000000	SiO ₂	G ₂	50	248.57500	27.500000 CaF ₂ G ₆
8	107.21122	12.619545			51	723.23935	0.500000
9	190.85163	20.000000	SiO ₂	G ₂	52	123.06548	42.963984 CaF ₂ G ₆
10	-560.78221	0.500000			53	568.02920	1.929341
11	4482.98861	19.095104	SiO ₂	G ₃	54	798.40481	21.145491 SiO ₂ G ₆
12	109.25270	19.036007			55	80.88243	6.365035
13	-562.52015	15.382167	SiO ₂	G ₃	56	89.63627	39.251047 CaF ₂ G ₆
14	184.00884	23.167680			57	-3000.00000	0.530420
15	-117.90615	15.448042	SiO ₂	G ₃	58	-4944.71373	46.500000 SiO ₂ G ₆
16	5000.00000	48.718404			59	442.15484	18.732427
17	-5000.00000	26.416153	SiO ₂	G ₄	60	(ウエハ)	
18	-165.73836	31.081545			【0035】		
19	-124.20414	31.565534	SiO ₂	G ₄	【表5】		
20	-203.09274	0.500000					
21	-4915.52505	26.520978	SiO ₂	G ₄			
22	-321.56546	0.500000					
23	509.82729	29.000000	SiO ₂	G ₄			
24	-906.29678	0.500000					
25	360.83202	28.000000	SiO ₂	G ₄			
26	-2069.90140	0.500000					
27	246.84252	32.884285	CaF ₂	G ₄			
28	-3200.00000	0.500000					
29	-4980.80583	46.093480	SiO ₂	G ₅			
30	148.03902	11.669230					
31	234.61256	16.443006	SiO ₂	G ₅			
32	153.45418	31.004339					
33	-188.95798	14.321328	SiO ₂	G ₅			
34	500.84049	26.892063					
35	(開口絞り)	18.228745					
36	-167.99189	30.216688	SiO ₂	G ₅			
37	5000.00000	0.500000					
38	3130.64989	32.000000	CaF ₂	G ₆			
39	-188.11418	0.500000					
40	-1898.83868	21.000000	SiO ₂	G ₆			
41	-330.33425	0.500000					
42	336.89888	38.720628	CaF ₂	G ₆			

r	d								
0	(レチクル)	89.938439							
1	-278.31968	24.324989	SiO ₂	G ₁					
2	358.97399	14.000000							
3	630.65888	32.000000	SiO ₂	G ₁					
4	-279.63900	0.500000							
5	324.80109	30.000000	SiO ₂	G ₁					
6	-569.64601	0.500000							
7	254.51115	30.000000	SiO ₂	G ₂					
8	-2773.53473	0.500000							
9	188.08534	26.000000	SiO ₂	G ₂					
10	98.24738	16.726944							
11	192.49488	23.000000	SiO ₂	G ₂					
12	-556.35255	0.500000							
13	4619.33310	19.095104	SiO ₂	G ₃					
14	116.41300	18.338460							
15	-1099.49346	15.382167	SiO ₂	G ₃					
16	190.51069	26.216782							
17	-132.37738	15.448042	SiO ₂	G ₃					
18	1189.93256	57.729814							
19	-5000.00000	26.416153	SiO ₂	G ₄					
20	-203.62120	17.048271							
21	-123.56550	26.327345	SiO ₂	G ₄					
22	-204.21523	0.500000							
23	∞	26.520978	SiO ₂	G ₄					
24	-345.79464	0.500000							
25	584.04620	29.000000	SiO ₂	G ₄					
26	-602.24304	0.500000							
27	421.56019	28.000000	SiO ₂	G ₄					
28	-1123.34423	0.500000							
29	246.29006	41.457735	CaF ₂	G ₄					
30	-5000.00000	0.500000							
31	∞	31.780371	SiO ₂	G ₅					
32	159.19296	11.669230							
33	281.83842	16.443006	SiO ₂	G ₅					
34	175.89651	28.590762							
35	-193.86521	14.321328	SiO ₂	G ₅					
36	373.19656	26.892063							
37	(開口絞り)	20.226657							
38	-151.07311	18.537276	SiO ₂	G ₅					
39	∞	0.500000							
40	5000.00000	32.000000	CaF ₂	G ₆					
41	-182.33571	0.500000							
42	-1290.51915	21.000000	SiO ₂	G ₆					
43	-281.02753	0.500000							
44	389.15318	38.720628	CaF ₂	G ₆					
45	-363.76526	10.923296							
46	-227.45443	21.000000	SiO ₂	G ₆					
47	-1226.77556	0.500000							
48	490.61591	26.000000	CaF ₂	G ₆					
49	-1451.02767	0.500000							
50	342.24280	27.500000	SiO ₂	G ₆					
51	∞	0.500000							
52	245.62492	27.500000	CaF ₂	G ₆					
53	1282.50070	0.500000							
54	134.57766	42.963984	CaF ₂	G ₆					
55	635.87829	3.137255							
56	951.66806	33.023520	SiO ₂	G ₆					
57	83.44325	6.365035							
58	91.79955	39.251047	CaF ₂	G ₆					
59	355.00000	0.530420							
60	341.48270	46.500000	SiO ₂	G ₆					
61	465.17186	14.155299							
62	(ウエハ)								

【0036】

【表6】

実施例番号	1	2	3	4	5
(1) E _n	4040.2	4143.5	3221.0	3098.6	3315.9
L	1200	1200	1200	1200	1200
(2) E _x	-19785.5	-21729.2	-16530.8	-16521.4	-17323.4

β	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
$ L/\beta $	4800	4800	4800	4800	4800
(3) $b f_1$	425.457	374.783	426.000	404.945	415.223
f_1	402.204	361.596	405.169	390.801	375.243
$b f_1 / f_1$	1.058	1.036	1.051	1.036	1.107
(4) f_3	-58.747	-58.282	-63.470	-61.333	-66.475
$ f_3/L $	0.049	0.049	0.053	0.051	0.055
(5) f_5	-64.565	-63.925	-58.541	-60.395	-60.039
$ f_5/L $	0.054	0.053	0.049	0.050	0.050
(6) f_4	123.634	122.810	128.251	131.647	131.280
f_6	109.563	108.867	103.822	106.137	105.207
f_6/f_4	0.886	0.886	0.810	0.806	0.801
(7) $[\Sigma]$	-0.422	-0.431	-0.442	-0.453	-0.357
(8) f_2	258.588	266.756	266.822	255.282	275.357
f_2/L	0.215	0.222	0.222	0.213	0.229
(9) S	14	19	8	12	14
r_{\min}	118.18165	-118.38102	105.42692	109.25270	116.41300
n	1.56019	1.56019	1.56019	1.56019	1.56019
$ \phi \cdot L $	5.688	5.679	6.376	6.153	5.775

【0037】図7～図11に、それぞれ第1～第5実施例の球面収差、非点収差、歪曲収差、及び横収差を示す。各収差図において、NAは投影光学系の開口数、Yは像高を示す。また、非点収差図中、破線はメリジオナル像面、実線はサジタル像面を示す。各収差図より明らかなように、各実施例とも、所要のレンズ構成を取り、且つ前記各条件式を満たすことにより、良好な結像性能を有することが分かる。

【0038】なお、以上の各実施例では、193.4nmの光を供給するエキシマレーザを露光光源として用いた例を示したが、本発明はこれらの光源に限られることなく、248.4nmの光を供給するエキシマレーザ等の極紫外光源や、g線(436nm)、i線(365nm)の光を供給する水銀アークランプ、さらにはそれ以外の紫外領域の光を供給する光源を用いたものにも応用し得る。また、本実施例では露光波長のスペクトル幅が単色とみなせない場合での色収差補正を施す2種類の光学材料を用いたレンズ構成を示したが、エキシマレーザの発振波長の狭帯域化の技術が向上すれば、低コスト化の可能な単一光学材料で構成してもよいし、逆に複数種の光学材料を組み合わせ、より広いスペクトル幅の色収差を補正してスループットの向上を図ってもよい。

【0039】

【発明の効果】以上のように、本発明による投影光学系によれば、両側テレセントリックな光学系としながら、諸収差がバランス良く補正され、しかも大きな開口数を待つ高解像な投影光学系が達成できる。特に、本発明の投影光学系では、ディストーションとベッツパール和が極めて良好に補正されている。従って本発明によれば、大きな開口数に対する高次のコマ収差等の補正のみなら

ず、広い露光範囲での像面平坦性の確保と像歪を非常に低減する効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による投影光学系を適用する露光装置を示す概略図である。

【図2】本発明による第1実施例のレンズ構成図である。

【図3】本発明による第2実施例のレンズ構成図である。

【図4】本発明による第3実施例のレンズ構成図である。

【図5】本発明による第4実施例のレンズ構成図である。

【図6】本発明による第5実施例のレンズ構成図である。

【図7】本発明による第1実施例の諸収差図である。

【図8】本発明による第2実施例の諸収差図である。

【図9】本発明による第3実施例の諸収差図である。

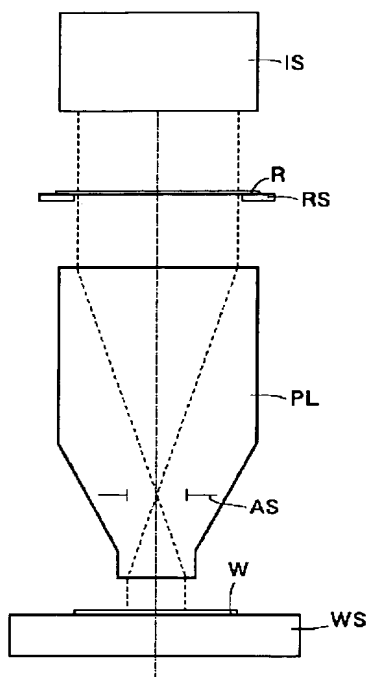
【図10】本発明による第4実施例の諸収差図である。

【図11】本発明による第5実施例の諸収差図である。

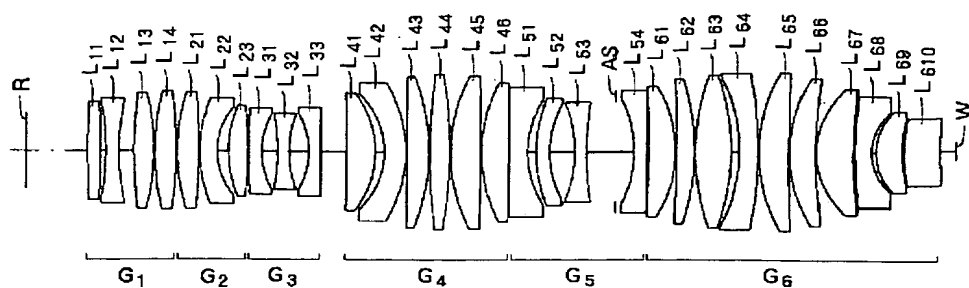
【符号の説明】

PL…投影光学系	IS…照明光学装置
R…レチクル	RS…レチクルステージ
W…ウエハ	WS…ウエハステージ
AS…開口絞り	
$G_1 \sim G_6$ …レンズ群	$L_{11} \sim L_{611}$ …レンズ

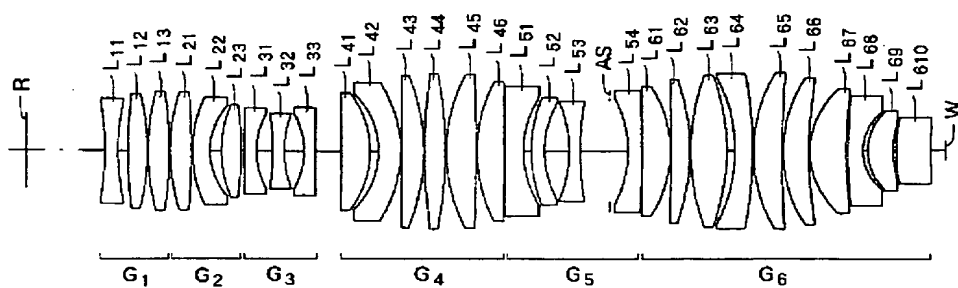
【図 1】



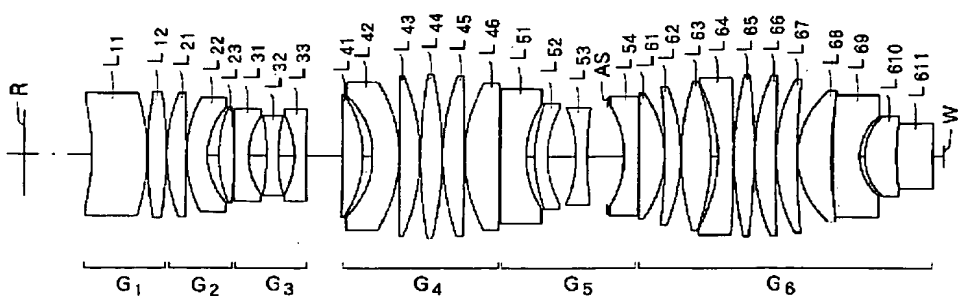
【図 3】



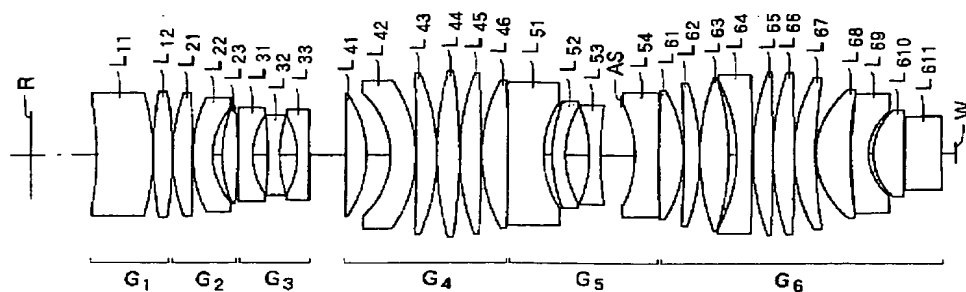
【図 2】



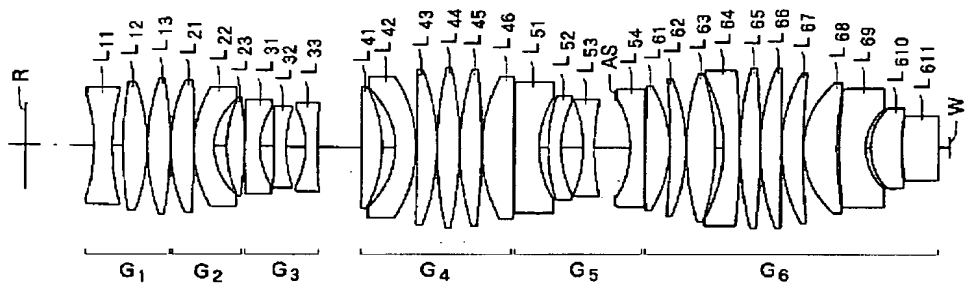
【図 4】



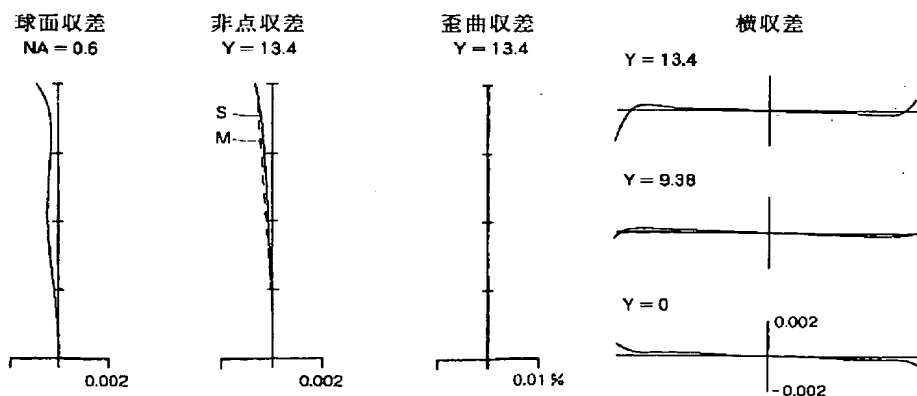
【図 5】



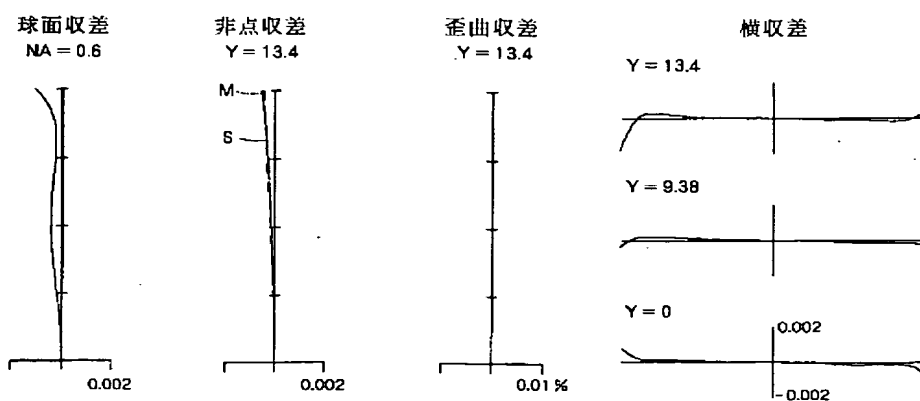
【図 6】



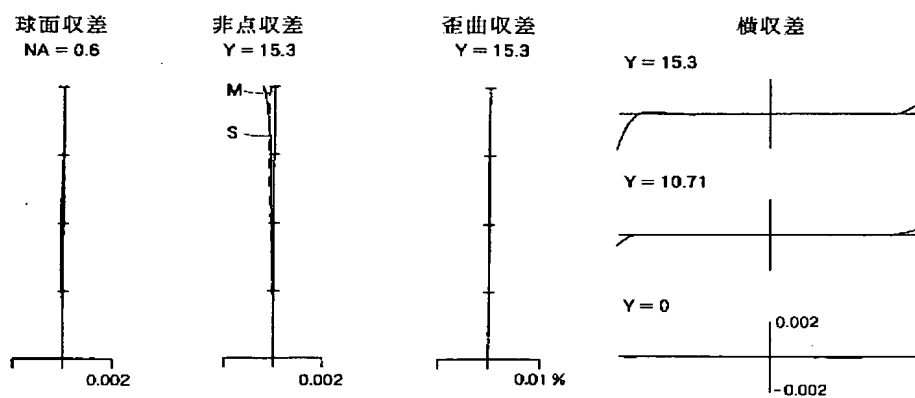
【図 7】



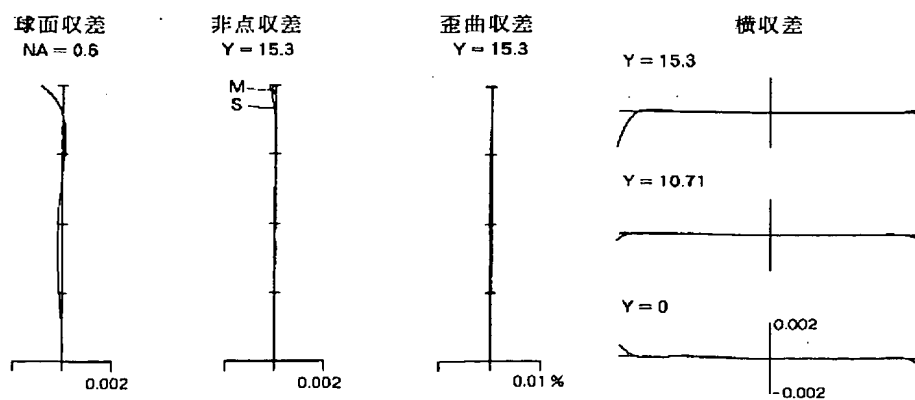
【図 8】



【図 9】



【図 10】



【図 1 1】

